

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Кузнецов В.А.*, Чернецкий М.Ю.**

*«Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

**ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

В работе представлены результаты моделирования горения пылеугольного топлива в топочной камере с вихревой горелкой на основе RANS подхода. В качестве объекта расчетного исследования выбран огневой стенд мощностью 2.4 МВт [1]. Математическое моделирование проводилось с использованием CFD-пакета ANSYS Fluent [2]. Модель включала в себя перенос излучения на основе дискретно-ординатного метода, движение частиц на основе подхода Лагранжа, горение в газовой фазе на основе гибридной модели, горение угольной частицы с использованием диффузионно-кинетического приближения. Для сравнительного анализа были выбраны модификации двухпараметрических моделей турбулентности $k-\epsilon$, $k-\omega$ SST, а также модели напряжений Рейнольдса. Результаты сравнения расчетных исследований и экспериментальных данных показали, что наиболее точно процессы тепло-массопереноса и горения угольной пыли в закрученном потоке описываются с использованием модели напряжений Рейнольдса.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, модели турбулентности, многофазные течения, уголь, пылеугольное горение.

The paper presents the results of modeling the combustion of pulverized coal in the combustion chamber with a swirl burner based on the RANS approach. As the object of the numerical study selected fire power 2.4 MW stand [1]. Mathematical modeling was carried out using CFD-package ANSYS Fluent [2]. The model included the transfer of radiation through discrete-ordinate method, the movement of particles through the Lagrange approach, the combustion in the gas phase based on the hybrid model, burning coal particles using diffusion-kinetic approach. For comparison we have chosen the modification of two-parameter models of turbulence $k-\epsilon$, $k-\omega$ SST, and Reynolds stress model. The results of studies comparing the calculated and experimental data have shown that the most accurate heat and mass transfer processes and the burning of coal dust in the swirling flow are described using the Reynolds stress model.

Keywords: computer simulation, turbulence models, multiphase flow, coal, pulverized coal combustion

Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1234-р от 28.08.2003 г., твердое органическое топливо станет основным источником для производства энергии (на крупных энергоблоках) на длительную перспективу, поэтому проблема повышения эффективности его использования и экономного расходования актуальна. Одним из наиболее производительных и эффективных способов переработки топлива является перевод его в пылевидное состояние и дальнейшее его использование в процессах газификации и горения. При этом проведение опытных сжиганий не может выявить в полной

мере существующие зависимости процессов газификации и горения угля от его качества и физико-химических процессов, имеющих место в топочной камере. Вследствие этого большую роль в разработке и совершенствовании угольных технологий отводится численному моделированию. Математическое моделирование топочно-горелочных устройств на сегодняшний день – один из важнейших способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене. Несмотря на большие успехи, достигнутые в развитии численного эксперимента, большое разнообразие, до конца не изученная структура угля и сложные химические процессы, происходящие при горении угольного топлива, не позволяют создать универсальных моделей. Поэтому остается актуальной задача поиска математических моделей с использованием существующих экспериментальных данных по углям и создания на их основе комплексной модели для расчетов.

В данной работе выполнен сравнительный анализ двухпараметрических моделей турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST, а также модели напряжений Рейнольдса при моделировании процессов тепломассопереноса и горения угольной пыли в закрученном потоке. В качестве объекта исследования был выбрана топочная камера с вихревым горелочным устройством [1]. Экспериментальные данные, полученные в работе [1], широко используются для тестирования математических моделей тепломассопереноса и горения пылеугольного топлива [3, 4]. Форма и размеры топочной камеры показаны на рис. 1. Геометрия и расчетная сетка модели топки представлена на рис. 1, б. Для расчета использовалась сетка размером 1 млн ячеек. Как показали предварительные исследования на сеточную сходимость,

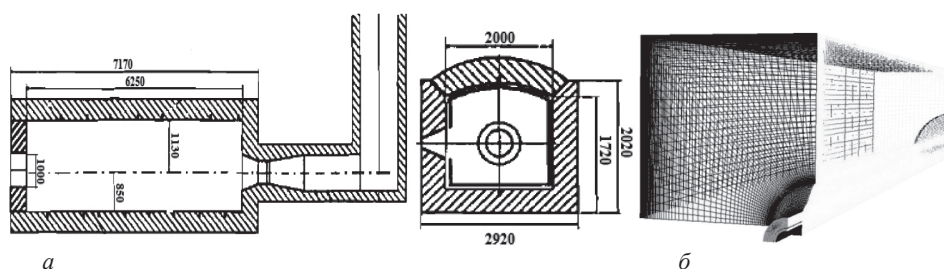


Рис. 1. Геометрия и размеры топочной камеры:
а – продольное и поперечное сечение топочной камеры (размеры в миллиметрах); б – модель и расчетная сетка топочной камеры

после увеличения количества расчетных ячеек более 1 млн, локальные значения основных величин (скорость, температура) изменялась незначительно. Состав угольного топлива приведен в табл. 1. Расходные характеристики окислителя, топлива представлены в табл. 2.

Математическое моделирование проводилось с использованием CFD-пакета ANSYS Fluent [2]. Для расчетов выбрана математическая модель, которая включала в себя описание движение несущей фазы на основе RANS подхода с двухпараметрическими моделями турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST, а также модели напряжений Рейнольдса. Перенос излучения рассматривался

Таблица 1

Состав топлива	
Технический состав топлива (% , на сухую массу)	
Летучие	37,4
Твердый углерод	54,3
Зола	8,3
Химический состав (% , на горючую массу)	
Углерод	80,36
Водород	5,08
Азот	1,45
Сера	0,94
Кислород	12,17
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	32,32

Таблица 2

Расходные характеристики воздуха, топлива	
Вторичный воздух	
Расход вторичного воздуха	2684 кг/ч
Площадь сечения входа	$2,7611 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
Температура	573,15 К
Плотность	0,616 кг/м ³
Средняя аксиальная скорость	43,83 м/с
Средняя тангенциальная скорость	49,42 м/с
Первичный воздух	
Расход угля	263 кг/ч
Расход воздуха	421 кг/ч
Площадь сечения	$4,9417 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
Температура	343,15
Плотность воздуха	1,028 кг/м ³
Средняя аксиальная скорость	23,02 м/с

на основе дискретно-ординатного метода, горение в газовой фазе – на основе гибридной модели. Для описания движения угольных частиц использовался метод Лагранжа с учетом влияния турбулентных пульсаций. Расчет температуры частицы учитывал конвективный и радиационный теплообмен частицы с окружающим газом. Для определения скорости выхода летучих использовался одностадийный механизм, основанный на выражении аррениусовского типа с обобщенными кинетическими константами. Скорость горения коксового остатка определялась с учетом характера подвода окислителя к реагирующей поверхности и кинетикой реагирования. Кинетические константы для рассматриваемого угля были взяты из работ [1]. Влияние частиц на осредненное движение газа, концентрацию газовых компонент и энтальпию учитывалось на основе метода PSI-cell, предложенного Кроу.

На рис. 2 представлены результаты расчета в виде распределения аксиальных и тангенциальных скоростей в трех сечениях: 0 м, 0,25 м и 0,85 м от входа в топочную камеру. Можно отметить, что все рассмотренные в работе модели турбулентности дают примерно одинаковые результаты.

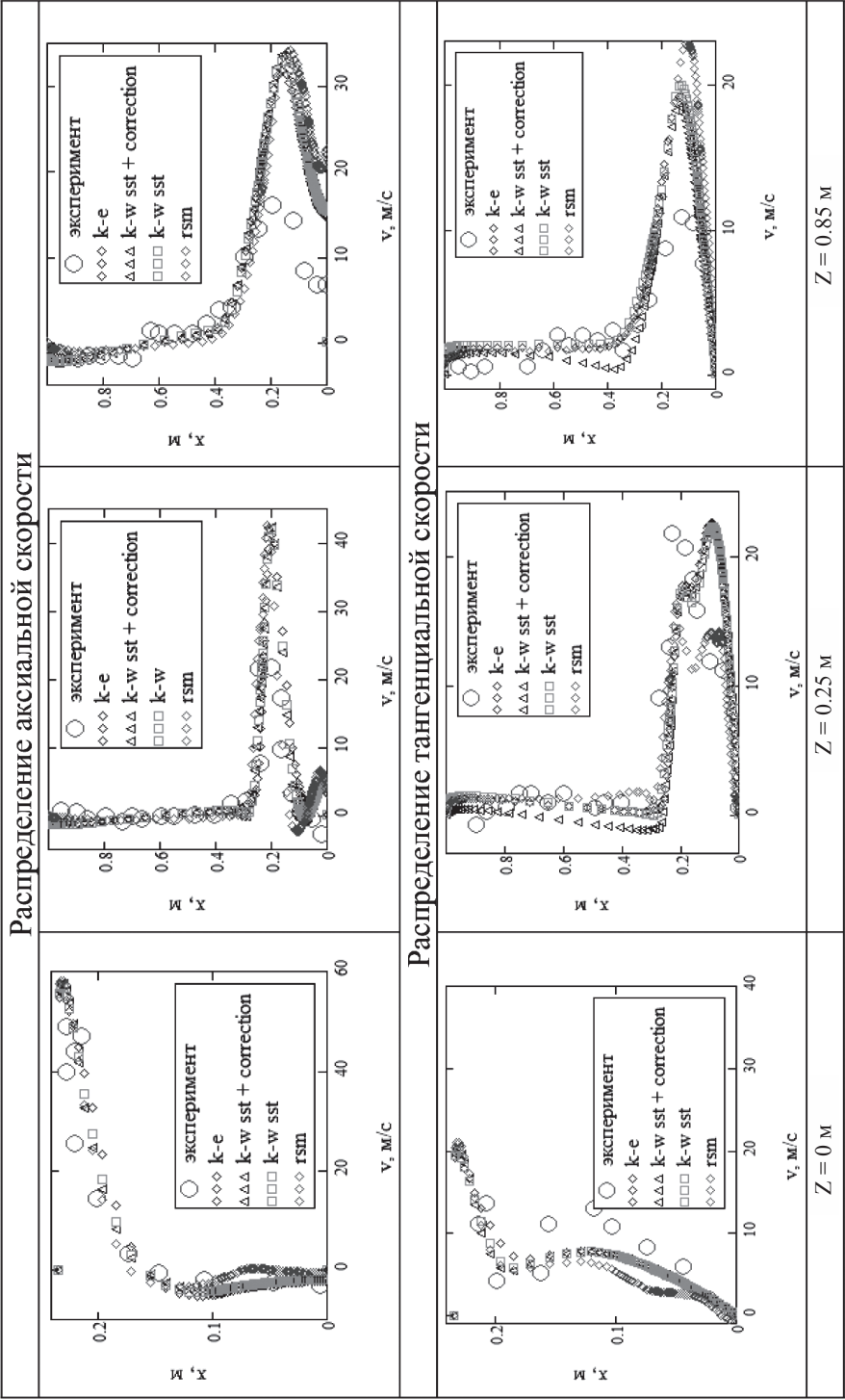


Рис. 2. Распределение распределения аксиальных и тангенциальных скоростей в поперечных сечениях

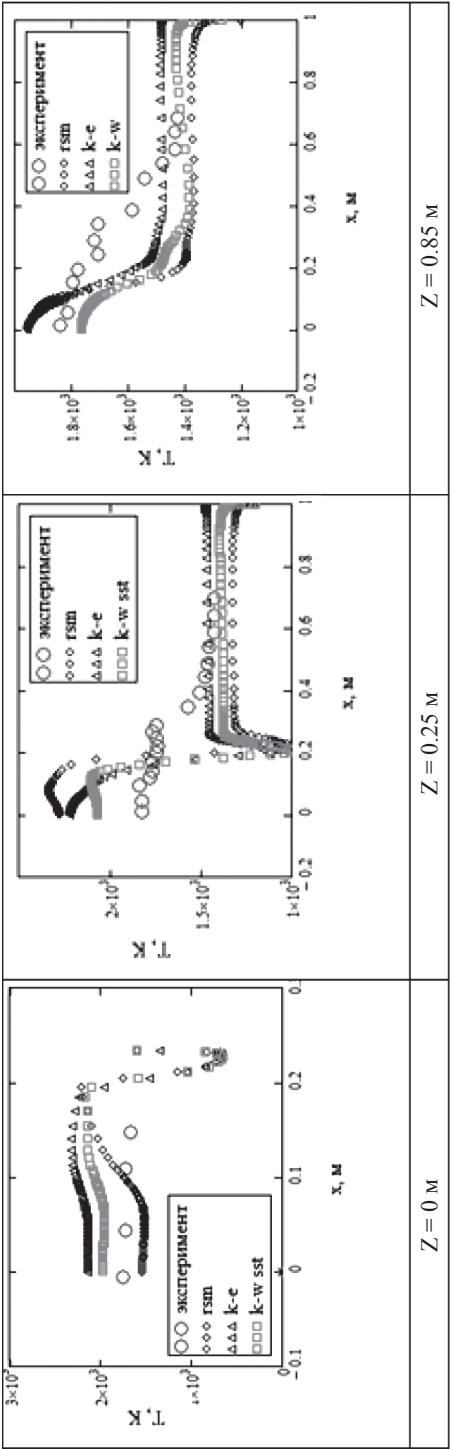


Рис. 3. Распределение температур в поперечных сечениях

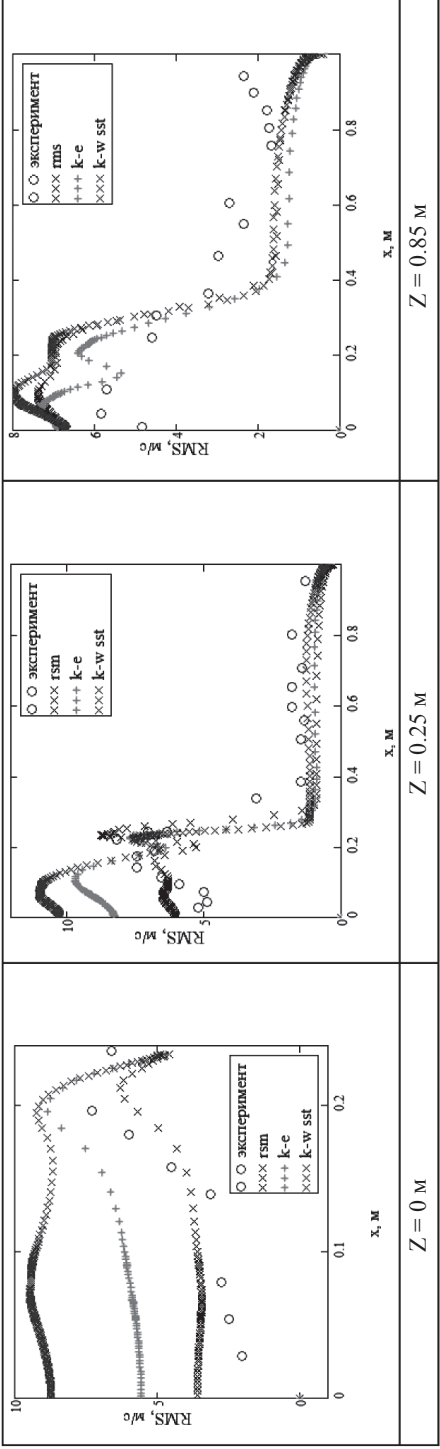


Рис. 4. Распределение пульсационных составляющих скорости в поперечных сечениях

На рис. 3 представлены распределения температур также в трех контрольных сечениях. Можно отметить, что наилучшим образом значения температур предсказывает комплексная математическая модель с использованием модели напряжений Рейнольдса. Одним из причин лучшего описания значений температур объясняется влиянием скоростных, температурных пульсаций несущего потока на движение угольных частиц и процессы горения.

На рис. 4 представлены значения пульсационных составляющих скорости при использовании разных моделей турбулентности и их сравнения с экспериментальными данными. Можно видеть, что двухпараметрические модели турбулентности значительно завышают значения данной величины. Наилучшим образом пульсационную составляющую скорости описывают модели напряжений Рейнольдса.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00524).

Список использованных источников

1. André A.F. Peters & Roman Weber, 1997, *Mathematical Modeling of a 2.4 MW Swirling Pulverized Coal Flame*, *Combustion Science and Technology*, 122:1–6, 131–182.
2. ANSYS FLUENT User's Guide. Release 14.0. ANSYS, Inc. November 2011.
3. G. Olenik, O.T. Stein, A. Kronenburg, 2015, *LES of swirl-stabilised pulverised coal combustion in IFRF furnace No. 1*, *Proceedings of the Combustion Institute* 35 (2015) 2819–2828.
4. M.G. De Giorgi, A. Ficarella, D. Laforgia. *Optimization of an industrial coal pulverized swirled burner by CFD modeling*, 61° Congresso Nazionale ATI – Perugia 12–15 Settembre 2006.